

EVOLUÇÃO DOS PERFIS DE MICRODUREZA DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 TREFILADO DURANTE O ENSAIO DE TRAÇÃO¹

*Elaine Carballo Siqueira Corrêa²
Roberto Braga Figueiredo³
Maria Teresa Paulino Aguilár⁴
Paulo Roberto Cetlin⁵*

Resumo

Neste trabalho, são analisadas as distribuições de microdureza ao longo do raio de barras de aço inoxidável AISI 304 trefiladas e trefiladas tracionadas em diferentes magnitudes de deformação. São investigadas quatro condições de operação, combinação de dois semi-ângulos de fieira e duas reduções de área. Além de evidenciar os efeitos destes parâmetros geométricos, os resultados apresentam a influência do modo de deformação no encruamento das barras trefiladas, uma vez que uma alteração gradual no formato do perfil de dureza foi verificada durante a tração subsequente.

Palavras-chave: Trefilação; Perfis de microdureza; Tração; Caminho de deformação.

MICROHARDNESS PROFILE EVOLUTION OF THE DRAWN AISI 304 STAINLESS STEEL BARS DURING TENSION

Abstract

In this paper, the microhardness profiles along the cross-section of drawn AISI 304 stainless steel bars before and after tension are investigated, considering several levels of deformation in tension. Four drawing conditions are analyzed, involving two die semi-angles and two area reductions. In addition to confirming the effects of the geometrical parameters of the process, the results show the influence of the strain path on the work hardening of the drawn bars, revealing the occurrence of changes in the shape of the hardness profile during the subsequent uniaxial test.

Key words: Drawing; Microhardness profile; Tension; Strain path.

¹ *Contribuição técnica apresentada no 61º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro - RJ.*

² *Dr., Pesquisador/Bolsista de Pós - Doutorado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG. elaine@demet.ufmg.br*

³ *Mestre, Bolsista de Doutorado da CAPES/University of Southern California, EUA.*

⁴ *Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG.*

⁵ *Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG.*

INTRODUÇÃO

A análise do comportamento mecânico de metais, durante e após operações de conformação, envolve a avaliação de diversos aspectos, que vão desde as características estruturais do próprio material até os parâmetros do processo investigado. Dentre os fatores observados, os efeitos de deformações plásticas previamente conduzidas aparecem como um dos mais importantes, especialmente para situações nas quais a peça desejada é confeccionada em múltiplos estágios.

Dessa forma, para a avaliação e uma possível previsão das propriedades mecânicas de um metal, o estudo da influência do caminho de deformação no encruamento do mesmo torna-se necessário. Este tema tem sido extensivamente investigado em experimentos associados ao processamento de chapas e ensaios mecânicos convencionais.⁽¹⁻⁶⁾ Os resultados indicam a ocorrência de níveis de encruamento distintos de acordo com a trajetória de deformação e com as características estruturais do material pesquisado, confirmando a importância do tópico e sugerem a expansão da análise para outras operações de conformação mecânica.

Dentro deste contexto, considerando o processo de trefilação de barras, o aspecto mais relevante da deformação plástica está associado à ocorrência de uma distorção interna decrescente da superfície para o centro da peça. Como resultado deste processo de cisalhamento, pode ser verificada uma distribuição de deformação heterogênea ao longo da seção transversal do metal trefilado. Esse perfil não uniforme de deformação, por sua vez, é responsável pela ocorrência de uma distribuição igualmente não homogênea de propriedades mecânicas na barra.^(7,8) Portanto, a análise do comportamento ulterior de amostras trefiladas deve incluir a avaliação deste gradiente de deformação e encruamento na peça.

Neste trabalho, são avaliados os perfis de microdureza e deformação ao longo da seção transversal de barras metálicas trefiladas, bem como a evolução do encruamento das amostras durante o ensaio mecânico uniaxial subsequente.

MATERIAL E MÉTODOS

Material – O material utilizado neste trabalho é o aço inoxidável AISI 304, cuja composição química (% em peso) é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em peso) do aço inoxidável AISI 304.

C	Mn	Si	Cr	Ni
0,047%	1,840%	0,711%	17,880%	8,190%

Corpos-de-Prova – As amostras a serem diretamente tracionadas foram confeccionadas com 10,00mm de diâmetro útil, enquanto os corpos-de-prova a serem trefilados ou trefilados e tracionados foram preparados com diâmetro útil de 10,43mm, 10,85mm e 11,18mm, valores determinados de acordo com a redução de área a ser utilizada na operação de conformação mecânica. Após a usinagem, todas as peças foram recozidas a 1050°C por 1320s.

Trefilação – As peças foram trefiladas em um passe em uma máquina de ensaios mecânicos Instron 4482, com um dispositivo especialmente projetado para o processo. Foram utilizadas quatro condições de operação, combinações de dois semi-ângulos de feira α e duas reduções de área r , cujos detalhes são exibidos na

Tabela 2. Os experimentos foram conduzidos a uma velocidade de $1,67 \times 10^{-1} \text{ mm/s}$. As taxas de deformação resultantes $\dot{\epsilon}$ e os valores de deformação externa ϵ para cada situação também são apresentados na Tabela 2. Todas as amostras foram lubrificadas com bissulfeto de molibdênio.

Tabela 2. Condições de trefilação.

Condição de Trefilação	Semi-Ângulo α	Redução de Área r	Deformação Externa ϵ	Taxa de Deformação $\dot{\epsilon}$
1	20°	8%	0,083	$2,35 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$
2	20°	20%	0,223	$2,30 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$
3	3°	8%	0,083	$3,39 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
4	3°	15%	0,016	$3,34 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

Ensaio de Tração – Os testes de tração também foram realizados em uma máquina Instron 4482, a uma velocidade de $6,67 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$, correspondendo a uma taxa de deformação inicial de $1,11 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Os experimentos foram conduzidos nos corpos-de-prova recozidos e nas amostras trefiladas, até distintos valores de deformação na tração, de maneira que pudesse ser obtida posteriormente a relação deformação ϵ - microdureza Vickers mHV para o aço inoxidável 304 e que fosse avaliada a evolução do encruamento nas barras pré-deformadas durante o ensaio subsequente.

Microdureza – Os ensaios de microdureza foram executados em uma máquina Future-Tech FM-1, com monitor Teli 9M1004 e penetrador Vickers. Todos os testes foram conduzidos na seção transversal das amostras, com carga de 300g e tempo de aplicação de 30s. Para os corpos-de-prova apenas tracionados, as indentações foram realizadas aleatoriamente e considerou-se um resultado médio de microdureza correspondente a cada valor de ϵ . Para as peças trefiladas e trefiladas tracionadas, as indentações foram medidas ao longo do raio das peças, em um total de 10 ou 11 impressões do centro à superfície (próximo à borda) das barras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 podem ser observados os dados de microdureza referentes ao aço inoxidável 304 apenas tracionado, por intermédio dos quais pode ser determinada uma equação relacionando ϵ e mHv .

Os perfis de microdureza do metal trefilado nas quatro condições de processamento e as distribuições de deformação ao longo da seção transversal do mesmo, determinadas por estes resultados e da equação exibida na Figura 1 (utilização da técnica dos perfis de microdureza,^(9,10)) são apresentados na Figura 2. Ressalta-se que o eixo das abscissas representa o raio relativo da barra, ou seja, a medida referente à localização do ponto dividida pelo valor do raio externo da amostra. De maneira geral, os gráficos evidenciam a influência dos parâmetros geométricos do processo de conformação mecânica nas propriedades mecânicas e na deformação do material. Considerando inicialmente as curvas microdureza x raio da barra (Figura 2(a)), para as situações nas quais $\alpha = 20^\circ$, observa-se a ocorrência de perfil não homogêneo. Esses resultados contrastam com aqueles obtidos para $\alpha = 3^\circ$, onde uma distribuição quase uniforme é verificada, especialmente para $r = 8\%$. A deformação efetiva das amostras (Figura 2(b)) obedece aos mesmos princípios, exibindo, porém, um aumento na heterogeneidade mais acentuado com a redução de área.

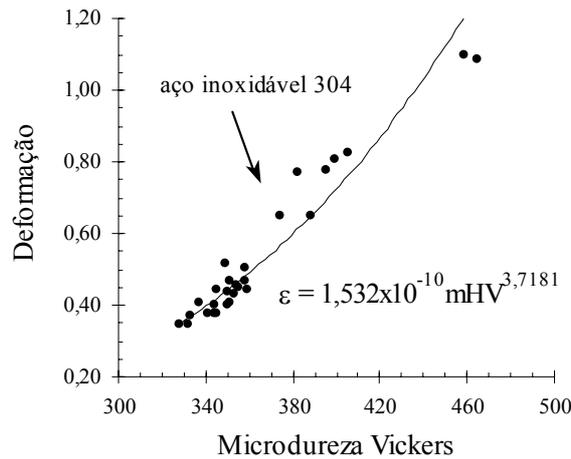


Figura 1. Curva e equação de deformação ϵ - microdureza Vickers mHV para o aço inoxidável AISI 304.

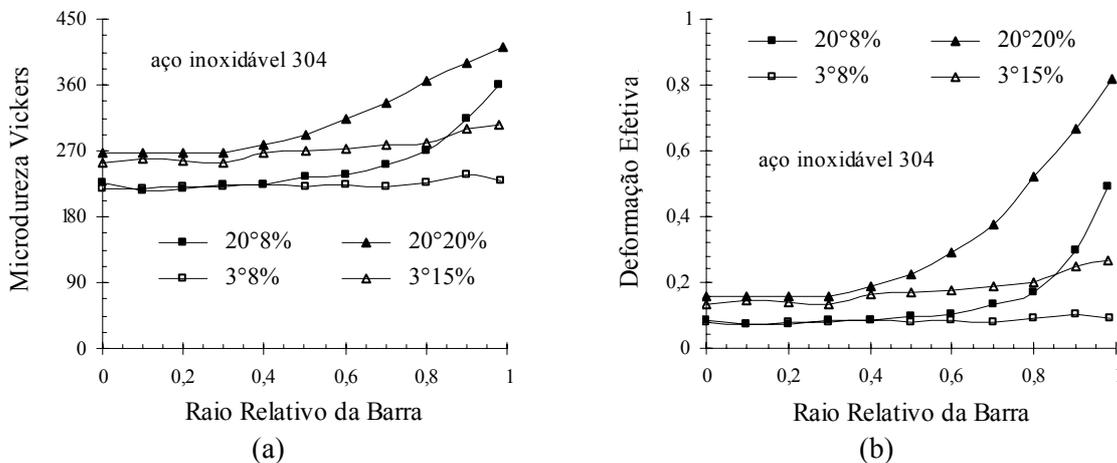


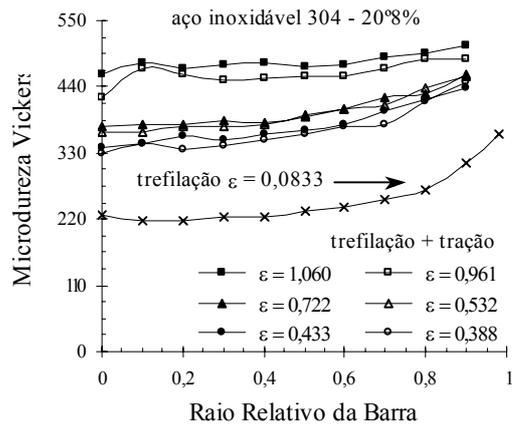
Figura 2. Distribuição ao longo do raio das barras de aço inoxidável AISI 304 trefiladas: (a) microdureza Vickers e (b) deformação efetiva.

A ocorrência de perfis de deformação e de propriedades mecânicas heterogêneos em metais trefilados, como observado para o aço inoxidável 304, é um fenômeno conhecido, já discutido em outros trabalhos,^(7,8,11-13) assim como o fato de que essa não uniformidade se torna mais acentuada com o aumento do semi-ângulo. Vale ressaltar, entretanto, que a utilização da técnica dos perfis de microdureza para a análise da deformação na trefilação pode ser questionada, uma vez que se trata de um procedimento indireto, ou seja, baseia-se na transformação de valores de microdureza em deformação a partir uma expressão obtida com amostras tracionadas. Dessa forma, devem ser observados dois pontos. Primeiro, a aplicação de testes de dureza em amostras trefiladas caracterizaria uma mudança no caminho de deformação, não sendo, portanto, adequada para a determinação de dados referentes apenas ao processo de trefilação. Como mencionado anteriormente, várias investigações evidenciam inclusive que diferentes materiais podem responder de maneira diversa a alterações na trajetória de deformação.^(1-3,5,6) Em adição a este fato, a utilização de uma equação estabelecida com ensaios de tração implicaria em uma relação única entre a microdureza e a deformação efetiva, independente da operação de conformação envolvida, entrando novamente em conflito com os

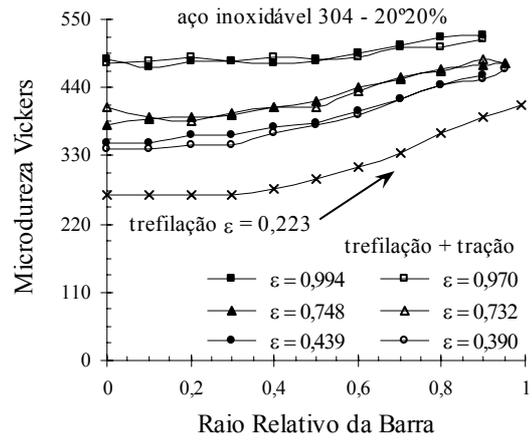
estudos sobre caminho de deformação. Especificamente em termos de dureza, dois trabalhos, nos quais são abordadas a extrusão de aço baixo carbono e a laminação de alumínio e cobre, aparecem com conclusões opostas sobre o tema.^(14,15)

Na Figura 3 podem ser observados os perfis de microdureza do material trefilado durante a tração posterior. Nota-se que os valores de deformação apresentados nos gráficos são calculados considerando a deformação externa das amostras. Para as duas condições, nas quais $\alpha = 3^\circ$ (Figura 3(c) e (d)), a aplicação de esforços de tração no metal, implicando em um aumento na deformação total da peça, apenas conduz a uma translação do perfil de dureza. Esses resultados contrastam com aqueles observados para as barras trefiladas com $\alpha = 20^\circ$ (Figura 3(c) e (d)), nas quais é verificada uma mudança significativa no formato das curvas. Neste caso, a distribuição de microdureza, antes heterogênea, tende a ficar mais uniforme à medida que a deformação na tração posterior aumenta. Esses dados sugerem que os materiais trefilados durante o ensaio subsequente tendem ao comportamento mecânico relativo à tração pura, para o qual se espera que a distribuição tanto de deformação como de dureza⁽¹¹⁾ independa da posição avaliada ao longo da seção transversal da amostra. Resultados relativamente análogos são mencionados em trabalhos nos quais corpos-de-prova de alumínio e de cobre previamente processados apresentaram durante o teste posterior, dentre outras características, curvas de escoamento e de taxa de encruamento aproximando-se daquelas típicas do ensaio uniaxial.^(3,4) Dessa forma, os dados expostos pelo aço inoxidável 304 novamente são associados a efeitos de mudanças no caminho de deformação.

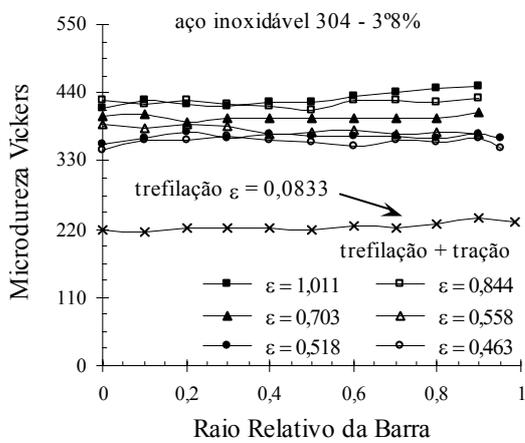
Por fim, ainda em relação aos resultados das amostras nas quais é verificada uma alteração na forma do perfil da propriedade mecânica, Figura 3(a) e (b), observa-se que a modificação indicada parece ocorrer apenas para níveis de deformação na tração seguinte mais elevados. As curvas relativas aos menores valores de deformação ($\varepsilon = 0,388$ para $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$ e $\varepsilon = 0,390$ para $\alpha = 20^\circ$ e $r = 20\%$) aparentam ser apenas um deslocamento da distribuição de microdureza das barras de aço inoxidável trefiladas. A princípio, considerando novamente o fato de que a deformação aplicada durante a tração é homogênea ao longo do raio das amostras e também o formato da curva ε -mHV (Figura 1), poderia supor-se que a aplicação de uma determinada deformação posterior levaria a um aumento maior da propriedade mecânica no centro do que na superfície da amostra trefilada, conforme o modelo representado na Figura 4. Dessa forma, os perfis de microdureza deveriam ser mais uniformes também para resultados relativos ao início do ensaio de tração. No entanto, este fenômeno não ocorre, evidenciando mais uma vez que a utilização de dados obtidos no teste uniaxial para a previsão do comportamento mecânico do metal trefilado não funcionaria, especialmente para valores associados ao início do escoamento do material no recarregamento. Ressalta-se que alterações no começo do segundo estágio de deformação, tanto em termos de tensões de fluxo como de taxa de encruamento, são apontados como alguns dos principais efeitos de caminho de deformação no processamento dos metais.^(2-4,6)



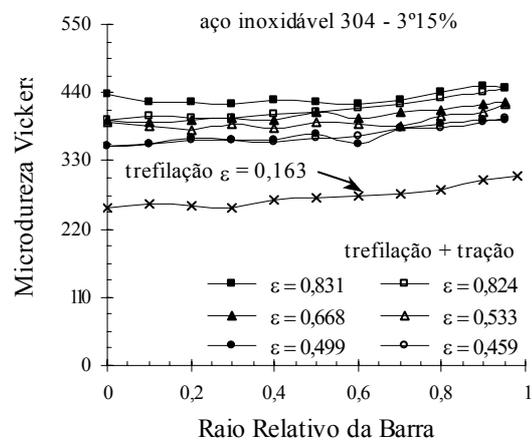
(a)



(b)

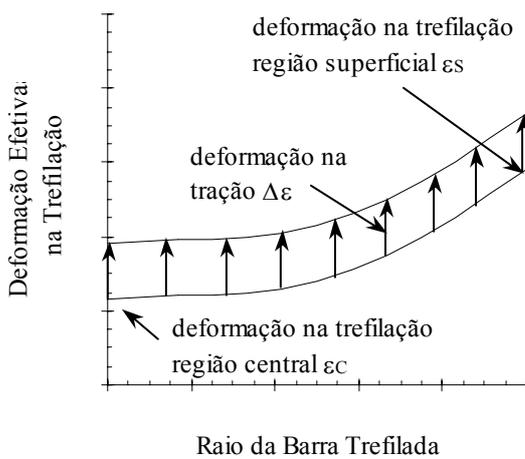


(c)

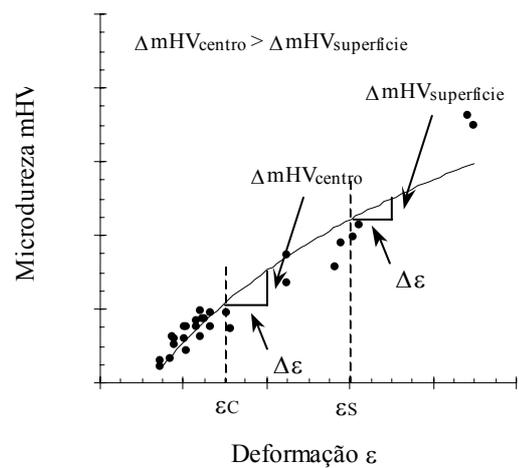


(d)

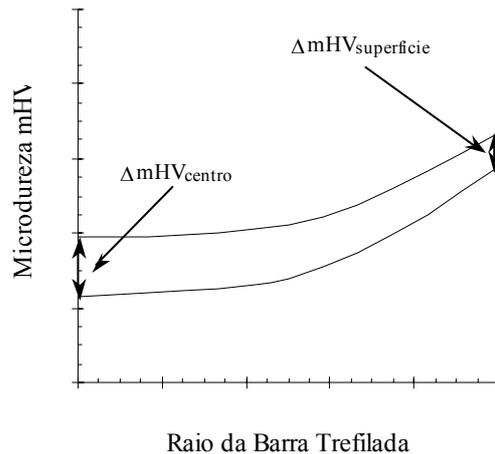
Figura 3. Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal das barras de aço inoxidável AISI 304 trefiladas e trefiladas tracionadas: (a) $\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$, (b) $\alpha = 20^\circ$ e $r = 20\%$, (c) $\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$ e (d) $\alpha = 3^\circ$ e $r = 15\%$.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Representação esquemática da evolução dos perfis de microdureza das barras trefiladas durante a tração: (a) distribuição de deformação efetiva ao longo da seção transversal da amostra trefilada e trefilada tracionada, (b) curva microdureza-deformação e (c) distribuição de microdureza na seção transversal do metal trefilado e trefilado tracionado.

CONCLUSÕES

- É evidenciada a influência dos parâmetros geométricos de trefilação na distribuição tanto de propriedades mecânicas como de deformação. Para as situações nas quais o semi-ângulo de fiara é elevado, são observados perfis heterogêneos.
- Durante a tração subsequente, foi verificada uma alteração gradual no formato dos perfis de microdureza das peças trefiladas. As distribuições da referida propriedade inicialmente heterogêneas tornam-se mais uniformes, similarmente ao que é obtido em amostras apenas tracionadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ e à CAPES pelo apoio financeiro, ao CDTN/CNEN pelo jateamento dos corpos-de-prova, e à Belgo Mineira Bekaert Artefatos, pela doação das fiaras de trefilação.

REFERÊNCIAS

- 1 LLOYD, D.J., SANG, H. The Influence of Strain Path on Subsequent Mechanical properties - Orthogonal Tensile Paths. **Metallurgical Transactions**, v. 10A, p. 1767-1772, November 1979.
- 2 DOUCET, A.B., WAGONER, R.H. Transient Tensile Behavior of Interstitial-Free Steel and 70/30 Brass Following Plane-Strain Deformation. **Metallurgical Transactions**, v. 20A, p. 1483-1493, August 1989.
- 3 WILSON, D.V., ZANDRAHIMI, M., ROBERTS, W.T. Effects of Changes in Strain Path on Work Hardening in Cp Aluminium and an Al-Cu-Mg Alloy. **Acta Metallurgica et Materialia**, v. 38, n. 2, p. 215-226, 1990.
- 4 VIEIRA, M.F., FERNANDES, J.V. Complex Strain Paths in Polycrystalline Copper: Microstructural Aspects. **Materials Research**, v. 2, n. 3, p. 185-189, 1999.
- 5 RAUCH, E.F., GRACIO, J.J., BARLAT, F., LOPES, A.B., DUARTE, J.F. Hardening Behavior and Structural Evolution Upon Strain Reversal of Aluminum Alloys. **Scripta Materialia**, v. 46, p. 881-886, 2002.
- 6 CORRÊA, E.C.S., AGUILAR, M.T.P., CETLIN, P.R. The Effect of Tension/Torsion Strain Path Changes on the Work Hardening of Cu-Zn Brass. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 124, p. 384-388, 2002.
- 7 SADOK, L., LUKSZA, J., MAJTA, J. Inhomogeneity of Mechanical Properties In Stainless Steel Rods After Drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 44, p. 129-141, 1994.
- 8 SADOK, L., LUKSZA, J., MAJTA, J., SKOLYSZEWSKI, A. Analysis of Inhomogeneity of Mechanical Properties In Stainless Steel Rods After Drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 45, p. 293-298, 1994.
- 9 BACKOFEN, W.A. *Deformation Processing*. 1 ed. Massachusetts: Addison Wesley Reading, 1972. 326p.
- 10 CETLIN, P.R. Redundant Deformation Factor Evaluation Through the Hardness Profile Method in Round Section Bar Drawing. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 106, p. 147-151, April 1984.
- 11 CADDELL, R.M., ATKINS, A.G. The Influence of Redundant Work When Drawing Rods Through Conical Dies. **Journal of Engineering for Industry**, p. 411-419, May 1968.
- 12 DIXIT, U.S., DIXIT, P.M. An Analysis of the Steady-State Wire Drawing of Strain Hardening Materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 47, p. 201-229, 1995.
- 13 GIFFORD, R.B., BANDAR, A.R., MISIOLEK, W.Z., COULTER, J.P. A Numerical Investigation of the Wire Drawing Process. In: *8th International Conference on Metal Forming - Metal Forming*, 2000, Cracóvia. **Anais...** p. 597-604.
- 14 ROBINSON, J.N., SHABAIK, A.H. The Determination of the Relationship Between Strain and Microhardness by Means of Visioplasticity. **Metallurgical Transactions**, v. 4, p. 2091-2095, September 1973.
- 15 ZEHETBAUER, M., TRATTNER, D. Effects of Stress-aided Static Recovery in Iteratively Cold- Worked Aluminum and Copper. **Materials Science and Engineering**, v. 89, p. 93-101, 1987.